

Desempeño sísmico de un pórtico con disipadores de energía pasivos de placas ranuradas de acero

Seismic performance of frames with passive energy dissipation steel slit plates

Juan Pimiento*, Andrés Salas*, Daniel Ruiz¹*

* Pontificia Universidad Javeriana. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 07/08/2014
Fecha de Aceptación: 12/11/2014
PAG 283-298

Resumen

En este artículo se evalúan dos tipos de disipadores de energía pasivos histeréticos metálicos (placas ranuradas de acero). Estos dispositivos son de bajo costo y de fácil construcción e instalación. Con ensayos en mesa vibratoria se estudió el desempeño sísmico de tres modelos estructurales: un pórtico sin disipadores de energía y dos pórticos con dos tipos de placas ranuradas de acero. Los modelos fueron instrumentados con acelerómetros, galgas extensométricas y deformímetros; y fueron sometidos a dos tipos de señales sísmicas: un sismo regional y un sismo de campo cercano. Los resultados de los ensayos de laboratorio sugieren que los pórticos con las placas ranuradas de acero tienen hasta un 90% menos de distorsión de entrepiso que el pórtico sin rehabilitación. Esto se debe a que las placas ranuradas de acero disipan una gran parte de la energía suministrada por los sismos y los daños sobre la estructura de soporte se minimizan.

Palabras claves: Disipación pasiva de energía, dispositivos de fluencia, placas ranuradas de acero, ensayos de mesa vibratoria, rehabilitación sísmica

Abstract

This paper evaluates two types of hysteretic passive energy dissipation devices (steel slit plates). These devices are low-cost and easy to build and install. The seismic performance of three structural models were studied with shake table tests: a frame without energy dissipation device and two frames with two types of steel slit plates. The models were instrumented with accelerometers, strain gages and LVDTs, and were subjected to two types of earthquakes signals: a regional earthquake and a near-field ground motion. The results of laboratory tests suggest that the frame with steel slit plates have up to 90% less seismic drift than the frame without rehabilitation. This is because steel slit plates dissipated a large portion of the input energy supplied by earthquakes and the damage to the parent structure was minimized.

Keywords: Passive energy dissipation, yielding devices, steel slit plates, shake table tests, seismic retrofitting

1. Introducción y justificación

Cuando los movimientos de un terremoto actúan sobre una estructura, pueden afectar gravemente los elementos estructurales dado que son los que absorben la energía de entrada del sismo. Este tipo de daños resultan en procesos complicados de reparación y muchas veces la estructura puede quedar restringida en cuanto a ocupación o uso Karavasilis, et al. (2012).

De allí se deriva la necesidad de desarrollar técnicas o métodos de rehabilitación estructural para edificaciones existentes, que en Colombia ha venido cobrando importancia en las últimas tres décadas. Esta necesidad se justifica en dos aspectos: la mayoría de ciudades de Colombia se encuentran ubicadas en zonas de peligro sísmico intermedia y alto; y por otro lado, muchas de las edificaciones existentes no fueron diseñadas para soportar cargas sísmicas Oviedo J. y Duque M. (2009).

A pesar de que han surgido en los últimos años técnicas de rehabilitación sísmica de edificaciones existentes mediante el aumento de la capacidad de disipación de la energía; difieren de la premisa tradicional de rehabilitación que se ha impuesto en Colombia: aumento de la rigidez y la resistencia de las edificaciones principalmente con el refuerzo con muros estructurales de concreto.

1. Introduction and justification

When ground motions act on a structure, they can seriously affect the structural elements, since they absorb the earthquake's input energy. This kind of damage entail complicated retrofit processes and many times the use or occupation of the structure has to be restricted (Karavasilis, et al., 2012).

Therefore, it is necessary to develop structural retrofitting techniques or methods for existing buildings, which in Colombia have become increasingly relevant in the last three decades. This need is justified in two aspects: most Colombian cities are located in areas with seismic risk of high and medium intensity; on the other hand, many existing buildings were not designed to resist seismic loads (Oviedo and Duque 2009).

Although in the last years some seismic retrofitting techniques have been introduced for existing buildings, concerning increased energy dissipation capacity, they differ from the traditional rehabilitation premise that has predominated in Colombia; that is, increasing the buildings' stiffness and strength mainly by reinforcing with concrete structural walls.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:

Departamento de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana Colombia
E-mail: daniel.ruiz@javeriana.edu.co



Con base en lo anterior se vio la necesidad de realizar una innovación en Colombia a través de la adaptación de un dispositivo de disipación de energía de bajo costo y fácil fabricación con el fin de usarlo en la rehabilitación sísmica de pórticos de concreto existentes, como se presenta en las referencias Hossain et al. (2011) y Marín J. y Ruiz D. (2005).

Específicamente se trata de disipadores basados en placas con ranuras, que posicionados estratégicamente en las edificaciones, concentran el daño y la disipación de energía (por histéresis) en los mismos dispositivos disminuyendo los daños en los elementos estructurales.

2. Disipación de la energía inducida por un sismo

En una estructura sometida a movimientos sísmicos, la ley de conservación de energía convierte la energía de entrada en energía elástica y en energía disipada Medeot R. (2000), como se observa en la Ecuación 1:

$$E_I = E_P + E_K + E_\beta + E_H \quad (1)$$

Donde:

E_I : Energía de entrada.

E_P : Energía potencial.

E_K : Energía cinética.

E_β : Energía por amortiguamiento viscoso equivalente.

E_H : Energía por deformación histerética.

Se muestra en la Figura 1, un análisis del balance energético obtenido para un sistema inelástico de un grado de libertad sometido a un sismo, con un periodo estructural de 0.3 segundos y con una fuerza de fluencia del 20% de su peso. El amortiguamiento con respecto al crítico es del 3%.

Considering the above, Colombia saw the need to innovate by adapting a low-cost energy dissipation device that is easy to build, with the aim of using it in seismic retrofitting of existing concrete frames, as illustrated in the references of Hossain et al. (2011) and Marín and Ruiz (2005).

Specifically, they are dissipation devices based on steel slit plates, which, when strategically placed in the building, concentrate the damage and energy dissipation (by hysteresis) in the same devices, thereby reducing the damage in the structural elements.

2. Dissipation of the energy induced by an earthquake

In a structure subjected to ground motions, the law of conservation of energy transforms the input energy into elastic energy and dissipated energy (Medeot 2000), as shown in Equation 1:

Where:

E_I : Input energy.

E_P : Potential energy.

E_K : Kinetic energy.

E_β : Energy by equivalent viscous damping.

E_H : Energy by hysteretic deformation.

Figure 1 shows an analysis of the energy balance obtained for an inelastic system with a single degree of freedom subjected to an earthquake, with a structural period of 0.3 seconds and a yield strength of 20% its weight. Damping in relation to the critical point is 3%.

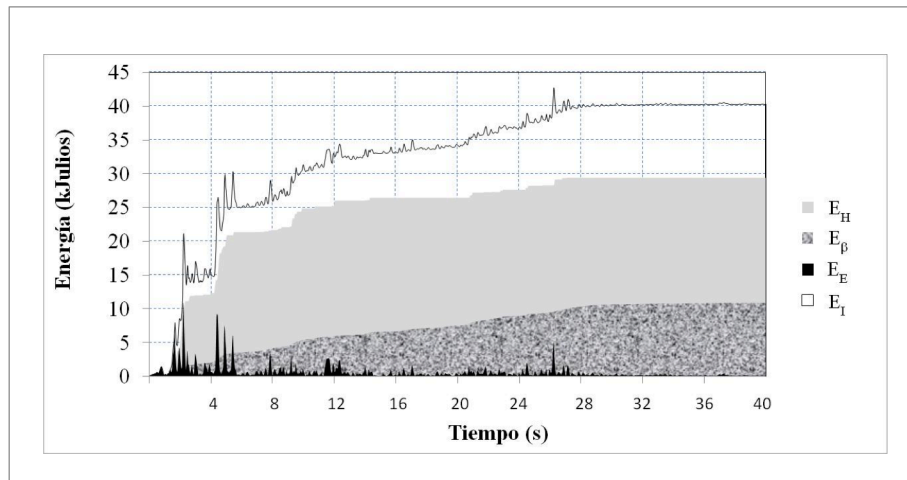


Figura 1. Balance energético de un oscilador simple inelástico sometido a una señal sísmica
Figure 1. Energy balance of a simple inelastic oscillator subjected to a seismic signal

En la Figura 1 se observa cómo al inicio, toda la energía se transforma en Energía Elástica (E_E) bien sea en energía cinética o en deformaciones elásticas (no permanentes). Pero cuando la energía de entrada se hace mayor, aproximadamente el 70% de la energía se disipa por histéresis (E_H) y la restante se disipa por amortiguamiento intrínseco de la estructura (E_b).

En un pórtico E_H aparece cuando los esfuerzos generados por el sismo en los elementos estructurales superan la región elástica de los materiales y por lo tanto la estructura recurre a la región inelástica. A partir de ese momento parte de la energía inducida por el sismo se traduce en deformaciones inelásticas y en daño. Esto se hace evidente en fenómenos como la fisuración, la fluencia y la aparición de rótulas plásticas.

El objetivo de la tecnología de disipación de energía propuesta es mantener este gran porcentaje de disipación de energía por histéresis, pero reduciendo los daños en los elementos estructurales. Para ello se propone un sistema que canaliza la energía y los daños hacia dispositivos que aprovecha la histéresis de placas con ranuras hechas de acero con una gran capacidad de ductilidad a la deformación unitaria.

3. Disipadores pasivos de energía histeréticos metálicos de placas con ranuras

Actualmente en el mundo existe una gran variedad de dispositivos disipadores de energía sísmica que pueden ser de tipo activo, pasivo y/o semi-activos. En la Figura 2 se ilustra las diferentes técnicas de disipación de energía, y se hace énfasis en los *disipadores de energía histeréticos pasivos metálicos* que son precisamente el tipo de dispositivos que se estudiarán en el presente documento.

In Figure 1 it can be seen how, at the beginning, all the energy is transformed into Elastic Energy (E_E), either in kinetic energy or (non-permanent) elastic deformations. But when the input energy increases, approximately 70% of the energy is dissipated by hysteresis (E_H) and the remaining one is dissipated by intrinsic damping of the structure (E_b).

In a frame, E_H appears when the stresses generated by the earthquake in the structural elements exceed the elastic region of the materials and, therefore, the structure resorts to the inelastic region. From then on, part of the energy induced by the earthquake produces inelastic deformations and damage. This is evident in phenomena like cracking, yielding and the appearance of plastic hinges.

The objective of the proposed energy dissipation technology is to maintain this large energy dissipation percentage by hysteresis, but reducing the damage in the structural elements. Therefore, we propose a system that canalizes the energy and the damage towards devices that benefit from the hysteresis of steel slit plates with a great ductility capacity to strain.

3. Hysteretic passive energy dissipation devices with steel slit plates

Currently there is a large variety of seismic energy dissipating devices in the world, which can be active, passive and/or semi-active. Figure 2 illustrates different energy dissipation techniques, and emphasis is put on metallic hysteretic passive energy dissipation systems, which are precisely the type of devices that are being dealt with in the present document.



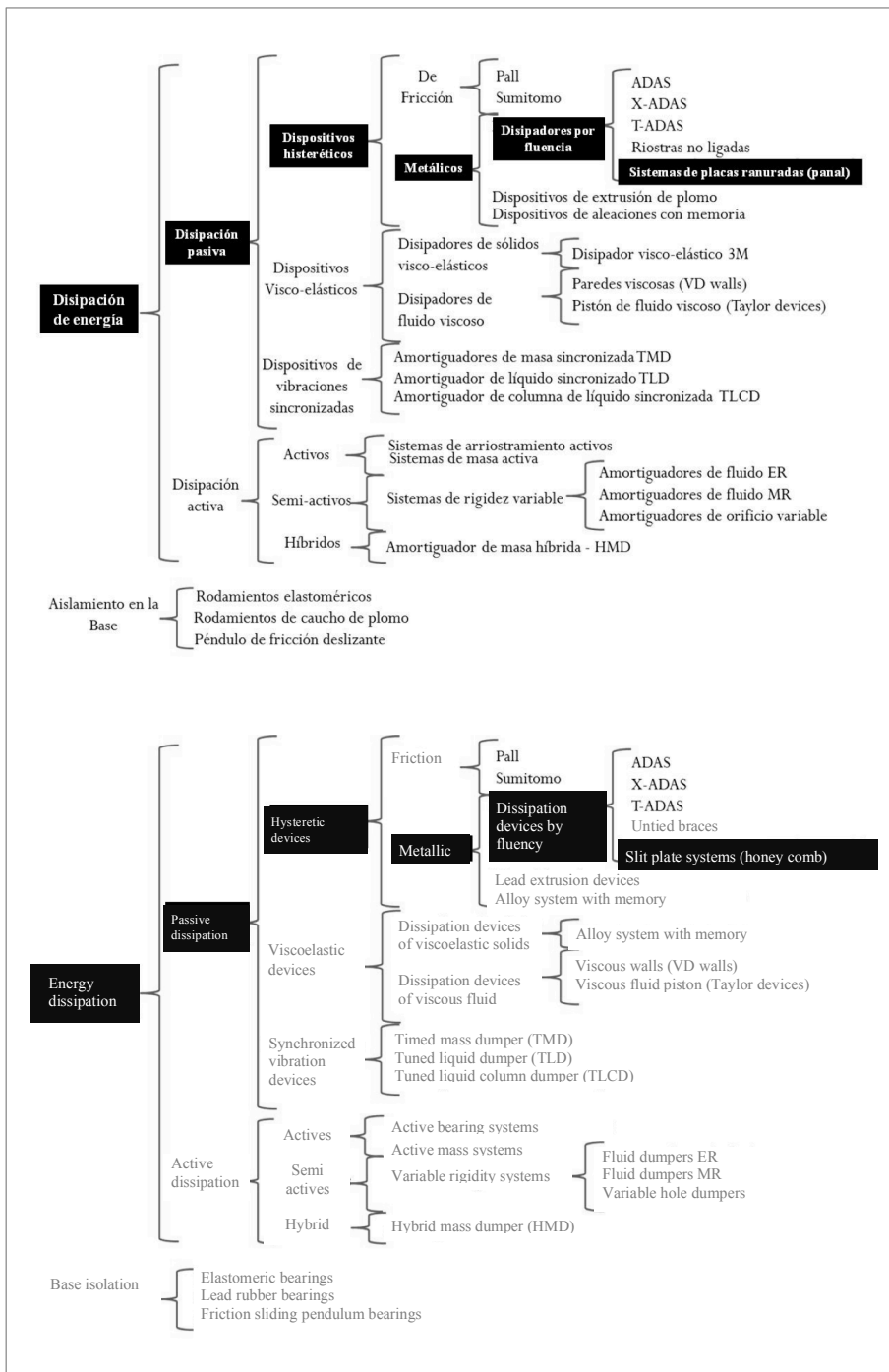


Figura 2. Cuadro conceptual de disipación de energía
Figure 2. Energy dissipation conceptual diagram



Los sistemas de disipación pasiva a diferencia de los otros sistemas, se basan en la no dependencia de una fuente de energía para trabajar. Estos sistemas resultan en una estrategia de mitigación más económica a comparación con los otros sistemas y su implementación tiene las siguientes ventajas Sadek et al. (2003):

- Los disipadores pasivos disminuye la respuesta de la estructura ante cargas externas dado al aumento en su amortiguamiento y rigidez.
- Los disipadores absorben gran parte de la energía actuante del sismo, evitando mayores daños en el sistema estructural del edificio. Normalmente la mayoría de estos daños se presentan en los disipadores lo que puede traducirse en un menor costo de reparación ya que estos son reemplazables Symans M., et al. (2008).

Los dispositivos pasivos por fluencia absorben parte de la energía que se genera en la estructura a través de ciclos de histéresis, evitando daños estructurales importantes. Esta energía que reciben los dispositivos hace que fluyan y en el peor de los casos hace que se presente la falla del dispositivo, pero no de los elementos estructurales de la edificación. De acuerdo con Xua Z. et al. (2007), incluso para condiciones críticas como movimientos sísmicos en campo cercano, los disipadores por fluencia pueden reducir simultáneamente el desplazamiento, la aceleración y la energía que deben soportar los elementos estructurales.

Los disipadores histeréticos estudiados en el presente trabajo (*Disipadores tipo placas con ranuras*) se caracterizan porque la disipación de la energía ocurre por la fluencia del acero, provocado por los desplazamientos relativos en el dispositivo Karavasilis et al. (2012). Este comportamiento puede ser modelado mediante relaciones histeréticas fuerza-desplazamiento. Sus ventajas radican en su comportamiento estable, buena resistencia a factores ambientales y de temperatura.

Las placas ranuradas en acero se ubican en el mismo plano del pórtico a intervenir (Figura 3), por lo tanto trabajan normalmente a fuerzas cortantes.

Unlike other systems, passive dissipation systems do not depend on an energy source in order to operate. These systems entail a more economical mitigation strategy compared with other systems and their implementation has the following advantages (Sadek et al., 2003):

- *Passive dissipation systems reduce the structure's response to external loads due to its increased damping and stiffness.*
- *Dissipation devices absorb great deal of the earthquake acting energy, preventing bigger damages in the building's structural system. Normally, most of these damages are produced in the dissipation devices, which can result in lower retrofit costs, since they can be replaced (Symans et al., 2008).*

Passive dissipation by yielding absorb part of the energy generated in the structure through cycles of hysteresis, thus avoiding considerable structural damages. The energy that the devices receive makes them run smoothly and, in the worst of cases, devices fail but not the structural elements of the building. According to Xua et al. (2007), even in critical conditions such as near-field ground motions, dissipation through yielding can simultaneously reduce the displacement, acceleration and the energy that the structural elements must bear.

Hysteretic devices studied in the present work (Steel slit plate dissipation systems) are characterized because energy dissipation is produced by the yielding of steel, due to the relative displacements in the device (Karavasilis et al., 2012). This behavior can be modeled through hysteretic strength-displacement ratios. Their advantages are its stable behavior, good resistance to environmental factors and temperature.

Steel slit plates are located in the same plane of the frame that needs to be retrofitted (Figure 3), therefore, they normally operate by shear forces.

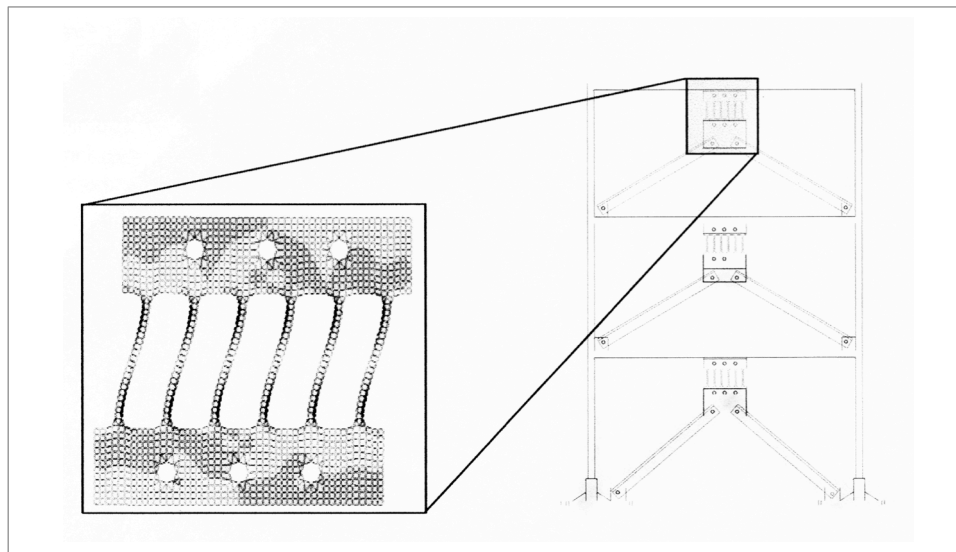


Figura 3. Disipador de energía tipo placa con ranuras sometida a esfuerzos cortantes
Figure 3. Steel slit plate energy dissipation system subjected to shear strain

Durante los años de desarrollo de este tipo de disipador, se ha estudiado tanto las posibles localizaciones de la platina en la estructura como el tipo de ranuras en las mismas (ranuras circulares, ovaladas, poligonales).

Para garantizar el desempeño y evitar concentraciones de esfuerzos en puntos indeseados de la platina con ranuras, investigadores como Benavent A., Hirishi A. (1999), Kunisue A., Koshika N. y Kurokawa Y. (2000), Reyes J. (2001), Wada A., Huang Y. y Iwata M. (2000), Marín J. y Ruiz D. (2005), Fuentes R., Martínez M. y Ruiz D. (2005), Chan R. y Albermani F. (2008), Chan R., Albermani F. y Williams M. (2009), Karavasilis T., Dimopoulos A. y Hale E. (2012), Chan R., Albermani F. y Kitipornchai S. (2013), Saffari H., Hedayat, A. y Poorsadeghi N. (2013), Ghabraie K., et. al (2010), Oh S., Kim Y. y Ryuc H. (2009) han propuesto diferentes tipos de disipadores con altos niveles de amortiguamiento histerético equivalente y con ciclos de histéresis muy estables.

Los disipadores de energía histeréticos pasivos metálicos de placas con ranuras tienen bajo costo dada la naturaleza del material y la facilidad en fabricación en talleres de metalmeccánica. Estos aspectos son muy importantes para países en vías de desarrollo.

4. Caracterización física y mecánica de los disipadores histeréticos metálicos bajo estudio

El diseño de los disipadores es similar a los establecidos por Marín J. y Ruiz D. (2005) y por Fuentes R., Martínez M. y Ruiz D. (2005), quienes se basaron en los trabajos de Reyes J. (2001), Hanson R. y Tsu Soong (2001) y Kunisue A., Koshika N. y Kurokawa Y. (2000).

Marín J. y Ruiz D. (2005) y Fuentes R., Martínez M. y Ruiz D. (2005) trabajaron sobre disipadores a escala 1:2; sin embargo para los ensayos en mesa vibratoria que se presentan en este documento la escala escogida fue de 1:3 por lo que las dimensiones establecidas por los autores originales fueron modificadas por el factor de escala. En ambos casos el acero usado fue A-36. En Marín J. y Ruiz D. (2005) se propuso una placa ranurada conformada por 6 columnas y en la referencia Fuentes R., Martínez M. y Ruiz D. (2005) se propuso un disipador con 6 agujeros circulares. En la Figura 4 se muestra el esquema básico de ambos disipadores con las dimensiones de los mismos a la escala 1:3 que será usada en el presente estudio. El acero usado para la fabricación de estas placas ranuradas fue ASTM-A36. Se incluyen en cada disipador seis agujeros adicionales que servirán para su vinculación a la estructura a rehabilitar. El espesor de estos disipadores fue de 3.2 mm.

During the development period of this type of dissipation system, both the possible locations of the plate in the structure and the type of slits in them (round, oval, polygonal) have been studied.

In order to guarantee the performance and avoid strain concentrations on undesired points of the slit plate, researchers like Benavent, Hirishi (1999), Kunisue, Koshika and Kurokawa (2000), Reyes (2001), Wada, Huang and Iwata (2000), Marín and Ruiz (2005), Fuentes, Martínez and Ruiz (2005), Chan and Albermani (2008), Chan, Albermani and Williams (2009), Karavasilis, Dimopoulos and Hale (2012), Chan, Albermani and Kitipornchai (2013), Saffari, Hedayat and Poorsadeghi (2013), Ghabraie et al. (2010), Oh, Kim and Ryuc (2009) have proposed different types of dissipation systems with high levels of equivalent hysteretic damping and very stable cycles of hysteresis.

Hysteretic passive energy dissipation devices with steel slit plates are low-cost given the nature of the material and because it is easy to manufacture them in metalworking workshops. These aspects are very important for developing countries.

4. Physical and mechanical characterization of the studied metallic hysteretic dissipation systems

The design of dissipation systems is similar to those established by Marín and Ruiz (2005) and Fuentes, Martínez and Ruiz (2005), based on the works of Reyes (2001), Hanson and Tsu Soong (2001) and Kunisue, Koshika and Kurokawa (2000).

Marín and Ruiz (2005) and Fuentes, Martínez and Ruiz (2005) worked on dissipation devices at a 1:2 scale; however, for the shake table tests presented in this document, the chosen scale was 1:3; therefore, the dimensions established by the original authors were modified by the scale factor. In both cases, the steel used was A-36. In Marín and Ruiz (2005) a slit plate with 6 columns was proposed and the reference Fuentes, Martínez and Ruiz (2005) proposed a dissipation devise with 6 holes. Figure 4 shows the basic scheme for both dissipation devices and their dimensions at the 1:3 scale that will be used in the present study. The steel used to manufacture these slit plates was ASTM-A36. Each dissipation system included six additional holes to connect them to the structure to be rehabilitated. The thickness of these dissipation devices was 3.2 mm.



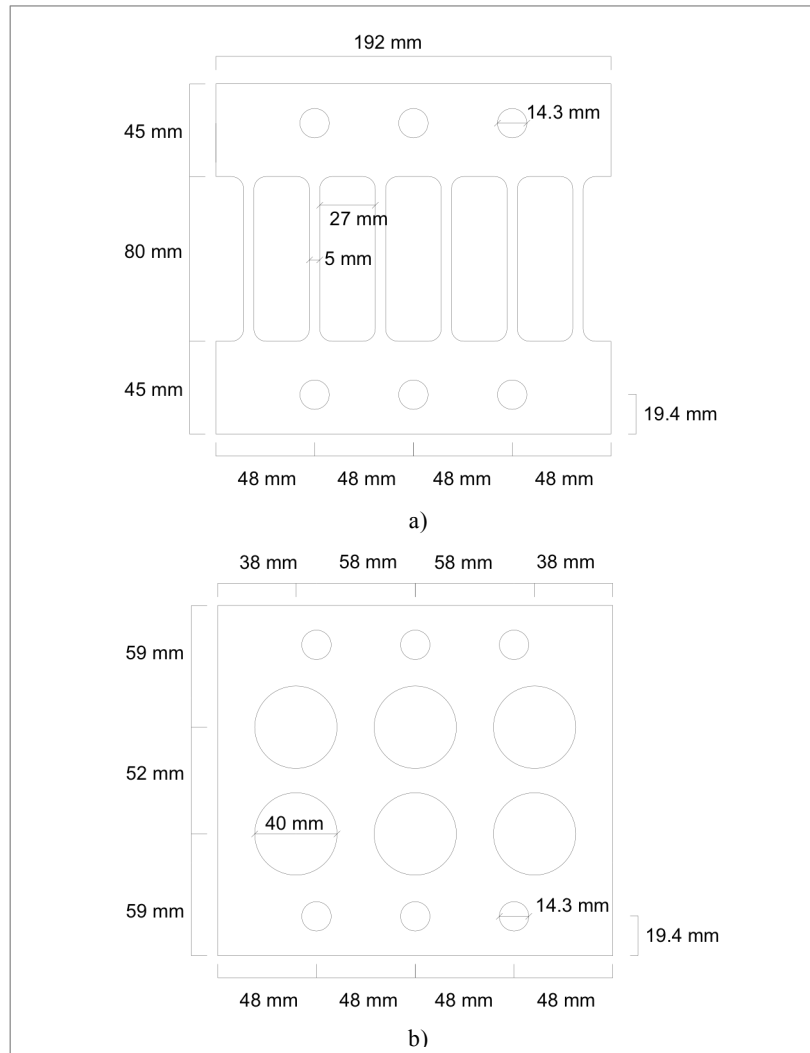


Figura 4. Dimensiones de disipadores histeréticos con placas ranuradas a) de 6 columnas Marín J. y Ruiz D. (2005) y b) con 6 agujeros circulares Fuentes R., Martínez M. y Ruiz D. (2005)
Figure 4. Dimensions of hysteretic dissipation devices with slit plates a) with 6 columns Marín and Ruiz (2005) and b) 6 holes Fuentes, Martínez and Ruiz (2005)

Es importante mencionar que previo a las pruebas experimentales, se realizó un modelo numérico en donde se pudo determinar que las rótulas plásticas del pórtico a rehabilitar se generaban en las placas ranuradas de la Figura 4 antes que en los elementos estructurales.

Para caracterizar el material implementado para la fabricación de los disipadores se realizaron pruebas de tensión y se determinó que el esfuerzo de fluencia del material era de 254 MPa y el esfuerzo de rotura de 365 MPa. La deformación unitaria máxima del material a la rotura fue de 17.5% (mm/mm).

Para obtener las propiedades mecánicas de los disipadores de placas ranuradas de la Figura 4, se diseñó y construyó un marco a través del cual fue posible ensayar simultáneamente dos disipadores de energía. Esta prueba es una adaptación de la referencia Reyes J. (2001). En esta prueba experimental se transforman las cargas axiales de una máquina universal de ensayos en una serie de fuerzas cortantes aplicadas en el plano de los disipadores, como las mostradas en la Figura 3. Se instalaron deformímetros para determinar la curva fuerza vs. desplazamiento.

It should be mentioned that prior to the experimental tests, a numerical model was carried out that allowed determining that plastic hinges of the frame to be rehabilitated were generated in the slit plates of Figure 4 before than in the structural elements.

In order to characterize the material implemented for the manufacture of dissipation devices, stress tests were performed which determined that the yield strength of the material was 254 MPa and the rupture strength was 365 MPa. The material's maximum strain in relation to rupture was 17.5% (mm/mm).

In order to obtain the mechanical properties of the dissipation devices with slit plates of Figure 4, a frame was designed and built through which it was possible to simultaneously test two energy dissipation devices. This test is an adaptation of the reference Reyes (2001). In this experimental test, axial loads of a universal testing machine were transformed in a series of shear forces applied in the plane of the dissipation device, as shown in Figure 3. Strain gages were installed to determine the strength vs. displacement curve.

Cada par de disipadores fue sometido a ciclos de carga y descarga sin recarga controlados por deformación (ensayos pseudoestáticos). Con base en las mediciones realizadas se establecieron las características básicas del comportamiento de los disipadores, como lo son las cargas y deformaciones de fluencia, la rigidez elástica y la inelástica. En la Figura 5 se muestra el montaje de la prueba experimental y el estado de los disipadores al finalizar el ensayo; en donde es evidente que las placas ranuradas se plastificaron.

Each pair of dissipation devices was subjected to loading and unloading cycles without reloading, controlled by deformation (pseudostatic analyses). Based on these measurements, the basic characteristics of the dissipation device's behavior were established, such as yielding loads and deformations, elastic and inelastic stiffness. Figure 5 shows the assembly of the experimental test and the state of the dissipation devices at the end of the test, where it is evident that the slit plates were plasticized.



Figura 5. Montaje del ensayo de caracterización mecánica del disipador con placas ranuradas
Figure 5. Assembly of the mechanical characterization test of the dissipation device with slit plates

Los datos de la prueba experimental se adaptaron a un modelo bilineal, que es el más recomendado para disipadores metálicos de comportamiento histerético de acuerdo con Marín J. y Ruiz D. (2005) y Hossain et al. (2011). En la Figura 6 se muestran los resultados experimentales con los datos teóricos de fluencia, que fueron determinados con modelos por elementos finitos (modelo constitutivo elastoplástico).

Data of the experimental test were adapted to a bilinear model, which is the most recommended for metallic dissipation devices of hysteretic behavior, according to Marín and Ruiz (2005) and Hossain et al. (2011). Figure 6 shows the experimental results with yielding theoretical data, which were determined with finite element analyses (elastoplastic constitutive model).

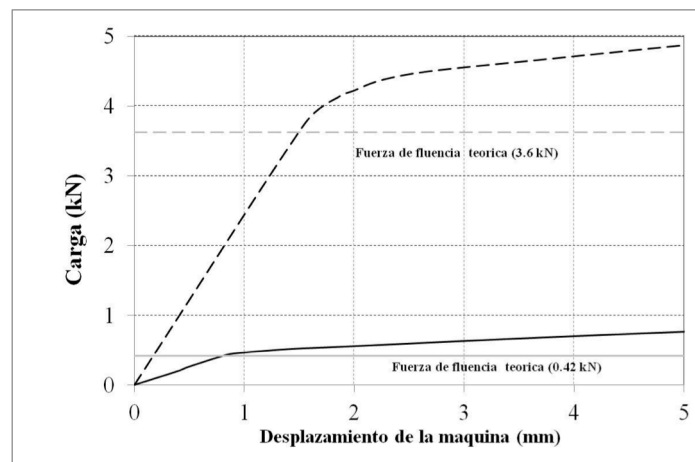


Figura 6. Curvas experimentales de fuerza cortante vs. desplazamiento en el plano de los disipadores de energía evaluados
Figure 6. Experimental curves of shear force vs. displacement in the plane of the evaluated energy dissipation devices

5. Ensayos en mesa vibratoria

Los ensayos se realizaron en la mesa vibratoria del Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana. El sistema consiste en una mesa accionada por un actuador dinámico de 100 kN de capacidad de carga que tiene un recorrido total de 250 mm (+/-125 mm) en dirección uniaxial. La plataforma de la mesa vibratoria es cuadrada con 1.5 m de lado y el conjunto actuador-mesa puede generar aceleraciones hasta de 5.0 g en modelos estructurales hasta de 15 kN de peso.

5.1 Pórtico en acero a estudiar

El pórtico en acero está construido a una escala de 1:3, constituido por cuatro columnas distribuidas en tres niveles. La altura entrepisos es de 75 centímetros para una altura total de 2.25 metros. La planta de la estructura es cuadrada de 1.30 m de lado y en cada nivel hay una estructura tipo parrilla en donde se ubica la masa del sistema. Los perfiles, tanto de vigas como de columnas, son tubulares de sección cuadrada de 30 mm de lado y 2.5 milímetros de espesor hechos con acero A36. Las uniones del pórtico son soldadas.

Los modelos fueron instrumentados con 4 galgas extensométricas, 4 acelerómetros sísmicos (uno por piso) y 4 deformímetros electrónicos tipo LVDT (uno por piso). Se usó un sistema de adquisición de datos registrando para cada uno de los 12 canales 2000 datos por segundo. Se registró también el desplazamiento y la fuerza generada por el actuador dinámico. Con los desplazamientos de cada uno de los pisos se determinó la distorsión de entrepiso como porcentaje de la altura (deriva sísmica) que es el valor que en la literatura técnica y científica se relaciona con los niveles de daño y con la efectividad de los dispositivos de disipación de energía pasivos.

El pórtico fue ensayado con y sin la rehabilitación con los dos tipos de disipadores mostrados en la Figura 4. Estos dispositivos fueron instalados en los ejes alineados con la dirección de aplicación del movimiento sísmico. Se instalaron dos disipadores en cada nivel de tal forma que los dos pórticos planos en dirección de la aplicación del movimiento tenían 3 disipadores cada uno para un total de 6 disipadores en el pórtico espacial. En la Figura 7 se muestra el pórtico rehabilitado con disipadores de energía de placas ranuradas con 6 agujeros circulares. Como parte del diseño experimental se desarrollaron modelos numéricos no lineales para el pórtico con y sin los disipadores en un programa de elementos finitos. Con estos modelos se validó que la ubicación, el tamaño y la geometría de los disipadores de energía fueran adecuados para mejorar el comportamiento sísmico del pórtico.

5. Shake table tests

Tests were carried out in the shake table of the Laboratory of Tests and Trials of the Pontificia Universidad Javeriana (Colombia). The device consists of a table driven by a dynamic actuator with load capacity of 100 kN and total displacement of 250 mm (+/-125 mm) in uniaxial direction. The platform of the shake table is a square of 1.5 m each side and the actuator-table assembly can generate accelerations up to 5.0 g in structural models of up to 15 kN in weight.

5.1 Studied steel frame

The steel frame is built on a 1:3 scale, and it is constituted by four columns distributed in three levels. The floor slab height is 0.75 m for a total height of 2.25 meters. The structure's floor plan is a square of 1.30 m side and in each level there is a grid-type structure where the mass of the system is located. The A36 steel sections of the beams and columns are tubular with 30 mm square section and 2.5 mm thickness. The joints of the frame are welded.

Models were implemented with 4 strain gages, 4 seismic accelerometers (one per floor) and 4 electronic LVDTs (one per floor). A data collection system was used which registered 2,000 data per second for each one of the 12 channels. The displacement and the force generated by the dynamic actuator were also registered. With the displacements of each floor, the slab distortion was determined as a percentage of the height (seismic drift), which is the value that in the technical and scientific literature is related to damage levels and the effectiveness of the passive energy dissipation devices.

The frame was tested with and without retrofitting with the two types of dissipation devices shown in Figure 4. These devices were installed in the axis aligned with the direction of the ground motion applied. Two dissipation devices were installed in each level, in such a way that the two flat frames directed towards the motion application had 3 dissipation devices each for a total of 6 dissipation devices in the spatial frame. Figure 7 shows the frame rehabilitated with energy dissipation devices with 6-hole slit plates. As part of the experimental design, non-linear numerical models were developed for the frame with and without dissipation devices in a finite element software. These models proved that the location, size and geometry of the energy dissipation devices were adequate to improve the frame's seismic behavior.



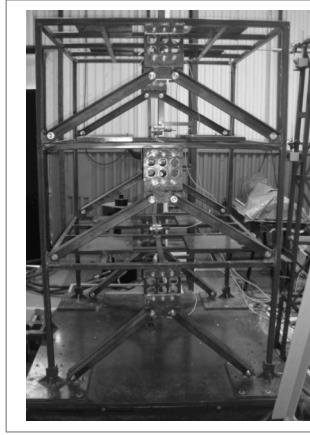


Figura 7. Imagen de pórtico rehabilitado con placas ranuradas con 6 agujeros circulares
Figure 7. Image of the frame retrofitted with slit plates with 6 holes

Según las condiciones de diseño para disipadores de energía histeréticos pasivos metálicos de placas con ranuras, se requiere de un montaje a base de riostras que otorguen una conexión rígida para que la energía de entrada al sistema se concentre en los disipadores y no en los elementos portantes. La instalación de cada uno de los disipadores al pórtico se realizó mediante dos riostras. Cada riostra estaba conformada por 2 ángulos de aletas iguales de 50 mm de lado y 6.35 mm de espesor para un total de 4 ángulos por disipador.

5.2 Sismos usados

Se utilizaron señales sísmicas acordes con la amenaza sísmica de Bogotá, capital de Colombia. Se usaron dos de las señales sísmicas de la referencia Marín J. y Ruiz D. (2005). Una de las dos señales corresponde a un sismo de origen cercano a la ciudad de Bogotá, con epicentro inferior a 5 km (Figura 8a). La otra señal corresponde a una señal de origen regional, con epicentro a 40 km (Figura 8b).

According to the design conditions for hysteretic passive energy dissipation devices with steel slit plates, the assembly requires braces to provide a stiff connection so that the input energy to the system is concentrated on the dissipation devices and not on the bearing elements. The installation of each dissipation device to the frame was made with two braces. Each brace was formed by 2 angle profiles with wings of 50 mm each side and 6.35 mm thick for a total of 4 angle profiles per dissipation device.

5.2 Earthquakes Used

Seismic signals were used in accordance with the seismic threat of Bogota, capital city of Colombia. Two of the seismic signals of the reference Marín and Ruiz (2005) were used. One of the signals corresponds to an earthquake near the city of Bogota, with epicenter of less than 5 km (Figure 8a). The other signal corresponds to a regional signal, with epicenter at 40 km (Figure 8b).

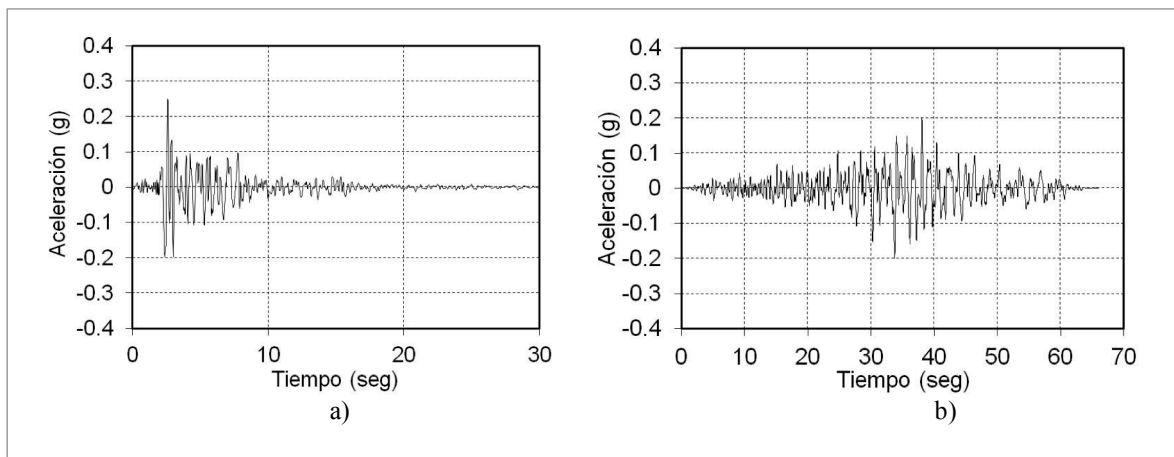


Figura 8. Señal de aceleración vs. tiempo para registro de a) sismo cercano y b) sismo Regional
Figure 8. Acceleration signal vs. registration time of a) near-field earthquake and b) regional earthquake

Las anteriores señales fueron modificadas de acuerdo con lo establecido por Harris H. y Sabnis G. (1999) para modelos a escala (leyes de la similitud), de tal manera que la señal sísmica que generó movimientos al pórtico de acero instrumentado tuvo una duración de la señal menor pero con un mayor nivel de aceleración.

The signals above were modified according to Harris and Sabnis (1999) in relation to the scale models (similitude laws), so that the seismic signal that generated motions in the steel frame holding the instruments had a lower signal duration but a higher acceleration level.

5.3 Estimación experimental de los periodos de los modelos estudiados

Con el fin de calcular el periodo experimental de los tres tipos de modelos ensayados en la mesa vibratoria (sin disipadores, con disipadores de placas ranuradas con 6 columnas y con disipadores de placas ranuradas con 6 agujeros) se hicieron mediciones de vibración libre. Con este periodo se calibraron los modelos numéricos elaborados en el programa SAP 2000 CSI (2012). Las comparaciones de los periodos estructurales se muestran en la Tabla 1.

5.3 Experimental estimate of period values for analyzed models

With the purpose of calculating the experimental period of the three types of models tested on the shake table (without dissipation devices, with dissipation device with 6-column slit plates, and with dissipation device with 6-hole slit plates), free vibration measurements were taken. This period was used to calibrate the numerical models elaborated in the software SAP 2000 CSI (2012). Table 1 shows the comparisons of the structural periods.

Tabla 1. Resumen de resultados de los periodos fundamentales de la estructura
Table 1. Summary of the results of the structure's main periods

Estructura Tipo/ Structure Type	Periodo estimado con SAP2000 (s)/ Estimated Period with SAP2000 (s)	Periodo determinado experimentalmente (s)/ Period determined experimentally (s)
Sin Disipadores de energía/ Without Energy Dissipation Devices	0.210	0.225
Con Disipadores de energía de placas ranuradas con 6 columnas/ With Slit Plate Energy Dissipation Devices with 6 Columns	0.091	0.094
Con Disipadores de energía de placas ranuradas con 6 columnas/ With Slit Plate Energy Dissipation Devices with 6 Columns	0.043	0.047

En la Tabla 1 es evidente que la presencia de los disipadores de placas ranuradas rigidizan el pórtico lo que se refleja en la disminución de su periodo natural de vibración. Así mismo los disipadores con placas ranuradas con 6 agujeros son más rígidos que los de 6 columnas metálicas, tal como se mostró en la Figura 6.

In Table 1 it is evident that the presence of the slit plate dissipation device stiffens the frame, which is reflected in the decrease of its natural vibration period. Likewise, slit plate dissipation devices with 6 holes are stiffer than those with 6 metallic columns, as shown in Figure 6.

5.4 Distorsión de entrepiso (deriva sísmica) y comportamiento de los modelos ante señales sísmicas de movimiento en la base

En las Figuras 9 y 10 se presentan los resultados experimentales para las distorsiones de entrepiso (derivadas sísmicas) más críticas en los ensayos realizados en la mesa vibratoria. Se presenta para cada modelo con disipadores de energía de placas ranuradas la deriva crítica para los dos sismos analizados. Las distorsiones de entrepiso se calculan como el desplazamiento del piso superior menos el desplazamiento del piso inferior dividido entre la altura del piso (en %). En cada una de las gráficas se muestra la deriva de la estructura con y sin la rehabilitación con los disipadores.

5.4 Floor slab distortion (seismic drift) and behavior of the models with ground motion signals on the base

Figures 9 and 10 show the experimental results for the more critical slabs distortions (seismic drifts) during the tests performed on the shake table. The critical drift is presented for the two analyzed earthquakes and each model with slit plate energy dissipation devices. Floor slab distortions are calculated as the higher floor displacement less the lower floor displacement divided by the floor height (in %). Each chart shows the drift of the structure with and without retrofitting with dissipation devices.



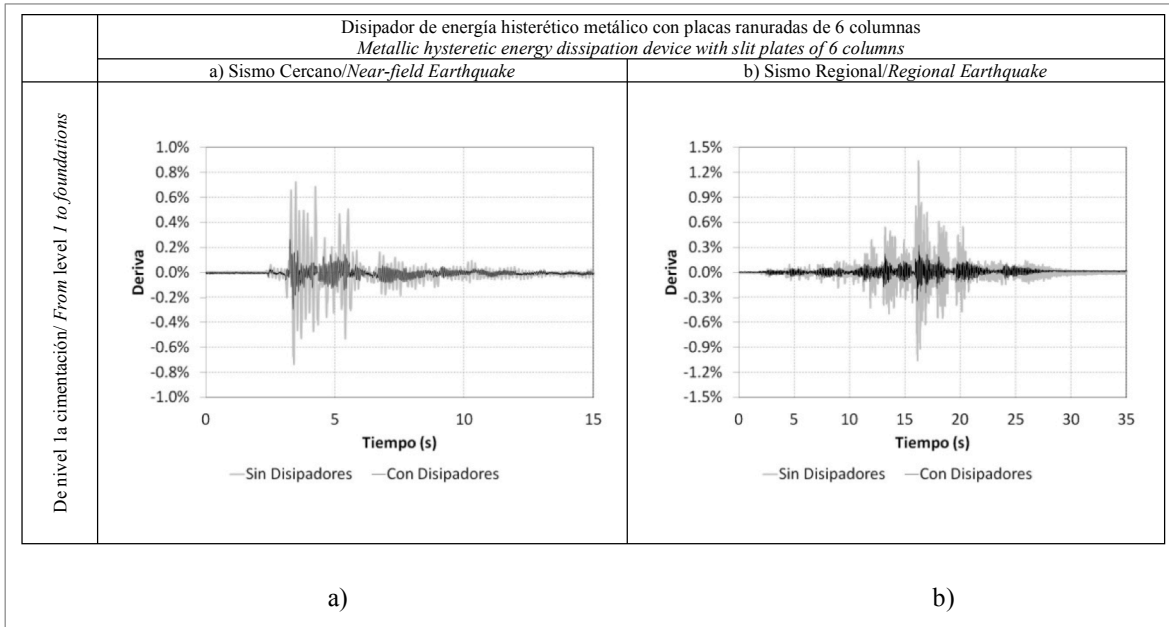


Figura 9. Deriva sísmica máxima en el pórtico de acero rehabilitado con placas ranuradas de 6 columnas
Figure 9. Maximum seismic drift in the steel frame rehabilitated with slit plates with 6 columns

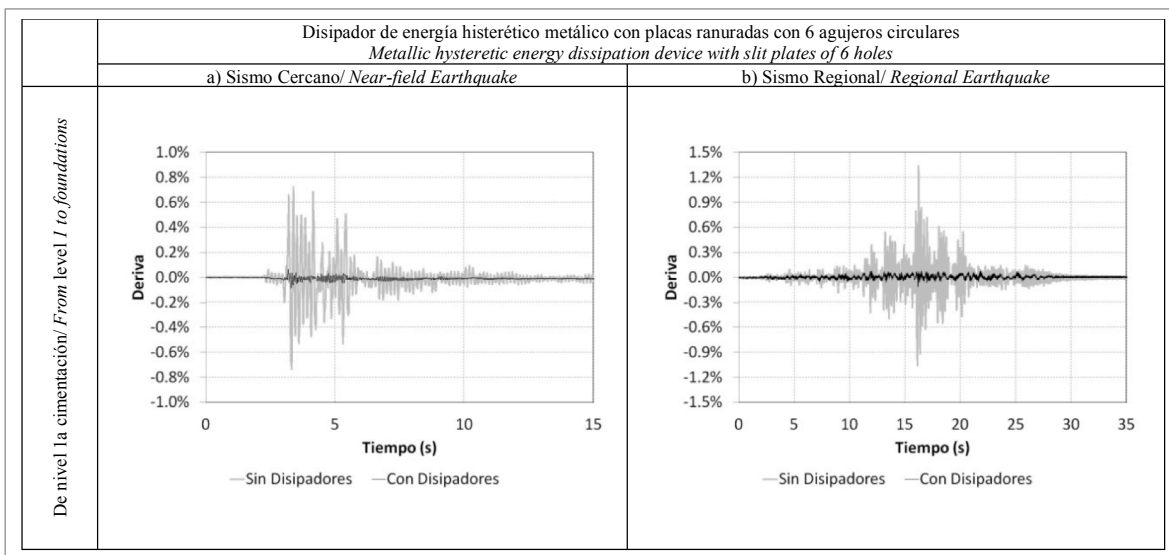


Figura 10. Deriva sísmica máxima en el pórtico de acero rehabilitado con placas ranuradas con 6 agujeros redondos
Figure 10. Maximum seismic drift in the steel frame rehabilitated with slit plates with 6 holes

A manera de resumen, en la Tabla 2 se presentan los valores de derivas máximas para cada uno de los modelos experimentales.

Table 2 presents a summary of the maximum drift values for each experimental model.



Tabla 2. Resumen de resultados de los periodos fundamentales de la estructura
Table 2. Summary of maximum drifts results for models tested in the shake table

	Niveles/Levels	Sismo Cercano/Near-field Earthquake	Sismo Regional/ Regional Earthquake
Sin disipadores/ Without dissipation devices	3 a 2	0.47 %	0.60 %
	2 a 1	0.64 %	0.89 %
	1 a cimentación/1 to foundations	0.74 %	1.34 %
Con disipadores ranurados de 6 columnas/ With Slit Plate Energy Dissipation Devices with 6 Columns	3 a 2/ 3 to 2	0.10 %	0.15 %
	2 a 1/ 2 to 1	0.18 %	0.25 %
	1 a cimentación/1 to foundations	0.30 %	0.35 %
Con disipadores ranurados con 6 agujeros redondos/ With Slit Plate Energy Dissipation Devices with 6 Holes	3 a 2/3 to 2	0.07 %	0.07 %
	2 a 1/3 to 2	0.10 %	0.13 %
	1 a cimentación/ 1 to foundation	0.09 %	0.11 %

De acuerdo con los anteriores resultados, se observa una disminución importante en las derivas al rehabilitar el pórtico con disipadores de energía histeréticos metálicos de placas ranuradas. El pórtico sin disipadores tuvo una deriva máxima de 1.34%, el pórtico rehabilitado con placas ranuradas de 6 columnas tuvo una deriva máxima de 0.35 % y el pórtico rehabilitado con placas ranuradas con 6 agujeros redondos tuvo una deriva máxima de 0.13 %. Estos resultados implican una reducción del 74 % y el 90% en las derivas máximas lo cual es consistente con las referencias Marín J. y Ruiz D. (2005) y Fuentes et al. (2005). Estas reducciones se ven reflejadas directamente en un menor nivel de esfuerzo para las uniones viga columna y en la disminución automática de los daños en elementos no estructurales. De acuerdo con los anteriores resultados aunque ambos disipadores generan un mejoramiento notable en el comportamiento mecánico del pórtico, el disipador basado en placas ranuradas con agujeros redondos tiene un mayor y mejor efecto en el sistema estructural, aunque es claro que dicho disipador es más rígido y resistente.

Para verificar que los disipadores estuvieran aportando rigidez, resistencia y capacidad de ductilidad al pórtico rehabilitado (con placas ranuradas con 6 columnas metálicas), se llevó a cabo un barrido de frecuencias con desplazamiento controlado de la mesa vibratoria. Para ello, y para un desplazamiento de 2 mm de la mesa vibratoria (con una función sinusoidal), se incrementó la frecuencia de movimiento desde 1Hz hasta 10 Hz.

Simultáneamente se registraron los desplazamientos totales en la cubierta del pórtico. Debe recordarse que la frecuencia de resonancia del pórtico fue de 10.6 Hz (0.094 s). En la Figura 11a se observa dicho registro de desplazamiento de la cubierta. Es evidente que al llegar a los 97 segundos a un desplazamiento total de 8 mm (desplazamiento relativo de 6 mm) a la frecuencia de resonancia del pórtico; se indujeron ciclos de carga y descarga en los disipadores que originaron una falla de los mismos por fatiga como se evidencia en la Figura 11b.

According to the above results, a relevant drift reduction is observed when retrofitting the frame with hysteretic energy dissipation devices with steel slit plates. The frame without dissipation devices had a maximum drift of 1.34%, the retrofitted frame with 6-column slit plates had a maximum drift of 0.35%, and the frame retrofitted with 6-hole slit plates had a maximum drift of 0.13%. These results imply a 74% and 90% reduction in the maximum drifts, which is consistent with the references of Marín and Ruiz (2005), and Fuentes et al. (2005). These reductions are directly reflected in lower stress levels for beam-column joints and the automatic damage reduction in non-structural elements. According to the above results, even if both devices generate a considerable improvement in the frame's mechanical behavior, the dissipation device based on slit plates with holes has a greater and better effect on the structural system, although it is clear that this device is stiffer and stronger.

In order to verify that the dissipation devices were contributing with stiffness, strength and ductility to the retrofitted frame (with 6-column steel slit plates), a frequency scanning with controlled displacement of the shake table was carried out. Therefore, and for 2 mm displacement of the shake table (with a sinusoidal function), the motion frequency was increased from 1 Hz to 10 Hz.

Total displacements in the frame's deck were simultaneously registered. It should be noted that the resonant frequency of the frame was 10.6 Hz (0.094 s). Figure 11a shows this displacement record of the deck. It is evident that when achieving at 97 seconds a total displacement of 8 mm (relative displacement of 6 mm) at the frame's resonant frequency, loading and unloading cycles were induced on the dissipation devices that originated a fatigue failure in them, as shows Figure 11b.



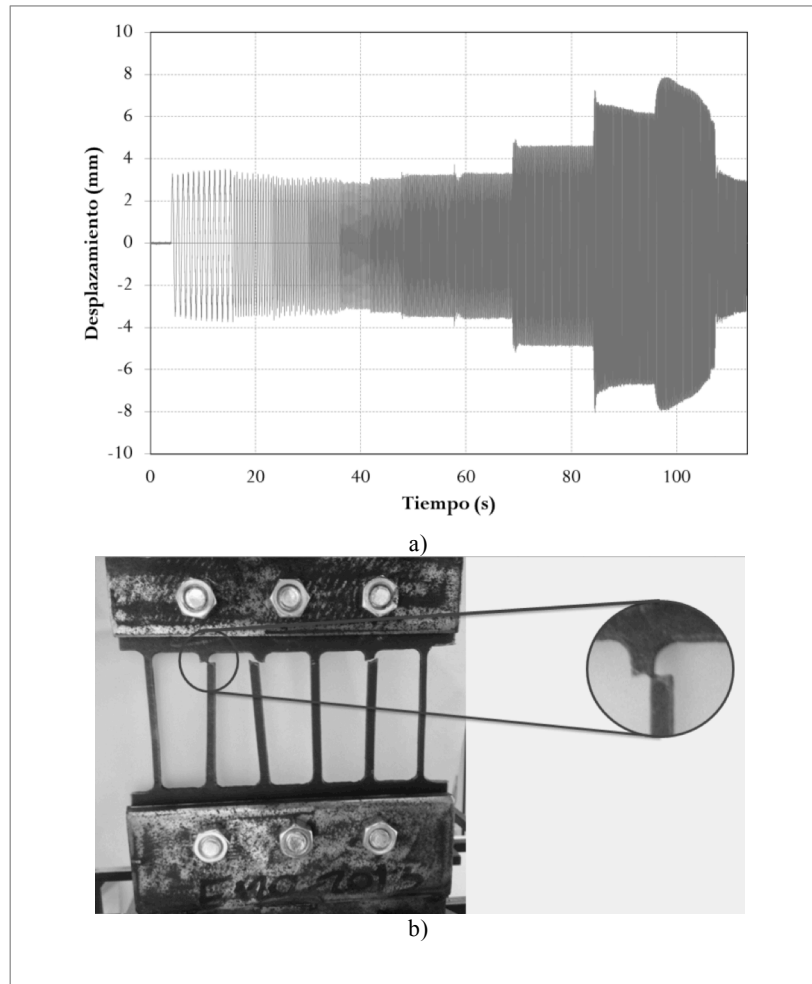


Figura 11. a) Desplazamiento total en la cubierta para diferentes frecuencias y una misma amplitud de desplazamiento de la mesa vibratoria. b) Falla de los disipadores por fatiga

Figure 11. a) Total displacement in the deck for different frequencies and the same displacement amplitude of the shake table. b) Fatigue failure of the dissipation devices

Para poder llegar al anterior resultado fue necesario aplicar 630 ciclos de carga y descarga a los disipadores histeréticos, lo cual es muy poco probable que suceda durante un evento sísmico real, en donde a lo sumo estarían sometidos a 10 ciclos de carga y descarga con esfuerzos cercanos a los de fluencia. Esto apunta a que este tipo de disipadores de energía tendrían ciclos histeréticos estables, con un adecuado nivel de disipación de energía y con una disminución de los daños elementos estructurales y no estructurales como consecuencia de la disminución de los niveles de deriva sísmica.

6. Conclusiones

- Los disipadores histeréticos pasivos metálicos de placas ranuradas instalados en el pórtico bajo análisis, modificaron las características dinámicas de éste. Por esto disminuyó el periodo fundamental del pórtico de 0.22 segundos a 0.094s y 0.047 s para la estructura con disipadores de placas ranuradas con columnas y con agujeros redondos, respectivamente.

In order to get the indicated result, it was necessary to apply 630 loading and unloading cycles to the hysteretic dissipation devices, which is not very likely to occur during a real seismic event, when they would be subjected to 10 loading and unloading cycles at most, with strengths similar to yield strengths. This suggests that this type of energy dissipation devices have stable hysteretic cycles, with an adequate level of energy dissipation and reduced damage in the structural and non-structural elements as a consequence of lower seismic drift levels.

6. Conclusions

- *The hysteretic passive dissipation devices with steel slit plates installed in the analyzed frame modified its dynamic characteristics. Therefore, the frame's fundamental period decreased from 0.22 seconds to 0.094 seconds and 0.047 seconds for the structure with slit plate dissipation devices with columns and holes, respectively.*

- Los disipadores lograron absorber gran parte de la energía de entrada de los movimientos sísmicos de la mesa vibratoria. Gracias a la capacidad de disipación de energía de las placas con ranuradas que componen éstos disipadores, lograron disminuir las fuerzas que actúan directamente en los elementos estructurales del pórtico. Por lo tanto, la vulnerabilidad sísmica del pórtico disminuyó.
- De acuerdo con los resultados experimentales, se obtuvo una reducción importante de la distorsión de entrepiso para los sismos bajo análisis en todos los niveles del pórtico. Los disipadores de placas ranuradas con agujeros redondos redujeron la deriva máxima en un 90 %, mientras que los disipadores de placas ranuradas con columnas metálicas disminuyeron la deriva en un 74%.
- El buen funcionamiento de la rehabilitación depende del diseño de los disipadores a implementar. El presente trabajo se desarrolló con base en un pórtico en particular, con características dinámicas propias del mismo y analizado bajo efectos sísmicos previamente designados. Es por esto que para rehabilitar una estructura con este tipo de disipadores de placas ranuradas es necesario realizar un análisis dinámico previo de la estructura considerando la peligrosidad sísmica de la edificación.
- *Dissipation devices were able to absorb most of the input energy of the shake table's ground motions. Due to the energy dissipation capacity of the slit plates in these devices, they were able to reduce the strengths acting directly on the frame's structural elements. Thus, the seismic vulnerability of the frame was reduced.*
- *According to the experimental results, a significant reduction was obtained in the slab floor distortion for the analyzed earthquakes in all levels of the frame. Dissipation devices with slit plates with holes reduced the maximum drift by 90%, while dissipation devices with slit plates with metallic columns reduced the drift by 74%.*
- *The good performance of rehabilitation depends on the design of the dissipation devices to be implemented. The present work was developed based on a specific frame, with inherent dynamic characteristics, which was analyzed under previously defined seismic effects. Therefore, in order to retrofit a structure with this type of slit plate dissipation device it is necessary to carry out a prior dynamic analysis of the structure considering the seismic risk of the building.*

7. Referencias/References

- Benavent A., Hirishi A. (1999)**, Proyecto De Estructuras Sismorresistentes Utilizando Dos Nuevos Disipadores De Energía De Tipo Histerético. *Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Murcia España.
- Chan R., Albermani F. (2008)**, Experimental Study of Steel Slit Damper for Passive Energy Dissipation. *Engineering Structures*. (30): 1058–1066, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.005>.
- Chan R., Albermani F., Williams M. (2009)**, Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation. *Journal of Constructional Steel Research*. (65): 260–268, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.03.017>.
- Chan R., Albermani F., Kitipornchai S. (2013)**, Experimental study of perforated yielding shear panel device for passive energy dissipation. *Journal of Constructional Steel Research*. (91): 14–25, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.08.013>.
- CSI (Computers and Structures Inc) (2012)**, *SAP2000 Nonlinear v15*. Structural Analysis Program.
- Fuentes R., Martínez M., Ruiz D. (2005)**, Comparación técnica de la rehabilitación de pórticos de concreto reforzado utilizando muros cortina y disipadores de energía pasivos metálicos e histeréticos construidos en Colombia. *Tesis de Pregrado*. Pontificia Universidad Javeriana. Dirigido por Ruiz D.
- Ghabraie K., Chan R., Huangb X., Xie Y. (2010)**, Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy. *Engineering Structures*. (32): 2258–2267, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.03.028>
- Harris H, Sabnis G. (1999)**, *Structural modeling and experimental techniques*. Washington D.C. CRC Press LLC.
- Hanson R., Tsu Soong. (2001)**, *Seismic Design with Supplemental Energy Dissipation Devices*. Oakland, CA, USA. Earthquake Engineering Research Institute.
- Hossain M., Ashraf M., Albermani F. (2011)**, Numerical modeling of yielding shear panel device for passive energy dissipation. *Thin-Walled Structures*. (49): 1032–1044.
- Karavasilis T., Dimopoulos A., Hale E. (2012)**, Seismic Design and Evaluation of a Minimal-damage Steel Frame Equipped with Steel Yielding Devices and Viscous Dampers. *15 World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal.
- Kunisue A., Koshika N., Kurokawa Y. (2000)**, Retrofitting Method Of Existing Reinforced Concrete Buildings using Elasto-Plastic Steel Dampers. *12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand.
- Marín J., Ruiz D. (2005)**, Rehabilitación de un pórtico de concreto reforzado mediante disipadores de energía pasivos metálicos construidos en Colombia. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas*. Concepción, Chile.
- Medeot R. (2000)**, New Design Approaches Based on Energy Concepts and Related Seismic Hardware. *12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand.
- Oh S., Kim Y., Ryuc H. (2009)**, Seismic performance of steel structures with slit dampers. *Engineering Structures*. (31): 1997–2008, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.03.003>.
- Oviedo J., Duque M. (2009)**, Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas. *Revista EIA*. (11): 51–63.
- Reyes J. (2001)**, Modelamiento Sísmico no lineal de estructuras con disipadores de energía. *Tesis de Magíster*. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Sadek F., Mohraz B., Taylor A., Chung R. (2003)**, *Passive Energy Dissipation for Seismic Applications*. Gaithersburg, Maryland, USA. National Institute of Standards and Technology.



-
- Saffari H., Hedayat A., Poorsadeghi N. (2013)**, Post-Northridge connections with slit dampers to enhance strength and ductility. *Journal of Constructional Steel Research*. (80): 138–152, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.09.023>.
- Symans M., Charney F., Whittaker A., Constantinou M., Kircher C., Johnson M., McNamara R. (2008)**, Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments. *Journal of Structural Engineering*. 134(1): 3-21, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(3\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(3))
- Wada A., Huang Y., Iwata M. (2000)**, Passive Damping Technology for Buildings in Japan. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2(3): 335-350.
- Xua Z., Agrawala A., He W., Tan P. (2007)**, Performance of passive energy dissipation systems during near-field ground motion type pulses. *Engineering Structures*. (29): 224–236, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.04.020>.

